干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.03.03

乌鲁木齐大气混合层厚度和稳定度与大气污染的关系①

李振杰[1]， 金莉莉[2,3]， 何 清[2,3]， 缪启龙[3]， 买买提艾力·买买提依明[2]

（1 云南省临沧市气象局，云南 临沧 677099； 2 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地，新疆 乌鲁木齐 830002； 3 南京信息工程大学应用气象学院，江苏 南京 210044）

摘 要：利用乌鲁木齐市4座10层100 m梯度气象塔2013年6月~2014年4月气象观测资料和7个环境监测站*AQI*资料，计算并分析了大气混合层厚度和稳定度特征，探讨了大气混合层厚度和稳定度与污染的关系。结果表明：乌鲁木齐市混合层厚度夏季郊区高、城区低，冬季从南郊—城区—北郊随地势降低依次降低；夏季和冬季分别在1 559~1 772 m和526~1 156 m之间。地面至2 km以上每500 m高度间隔统计混合层厚度，500~1 000 m出现频率最多；月变化为6~9月基本在500 m以上，且每个高度区间其概率均超过10%，10月~次年2月1 500 m以上区间概率明显减小；日变化为中午13:00~16:00达到最高值，下午和傍晚迅速下降。白天较大的感热输送提供充足的热力条件，这也体现出白天以不稳定层结为主，夜间则以稳定层结为主。大气稳定度分类结果，夏季郊区和城区不稳定（A~C类）所占比例差不多，冬季北郊稳定（E、F类）所占比较最大、城区最弱。*AQI*指数冬季最大，从南郊—城区—北郊依次增大，这与采暖期污染物多、南郊比北郊地势高有利于扩散输送有关。总体来看，乌鲁木齐大气混合层厚度空间分布与气象要素、大气稳定度、地形等密切相关，对*AQI*指数分布有重要影响，这对近地层大气污染状况预报有着重要的指导意义。

关 键 词： 乌鲁木齐污染；大气混合层厚度；大气稳定度
文章编号： 1000-6060(2019)03-0478-14(0478~0491)

混合层是湍流特征不连续界面以下的大气，表征污染物在垂直方向被热力湍流、动力湍流、对流输送所能达到的高度[1]。获得混合层厚度的方法，自20世纪80年代以来，主要有通过地面观测资料计算[2-3]、模型计算[4-5]、地面遥测仪器观测计算[6-14]。

20世纪60年代开始，国外学者对混合层厚度进行了研究[15-16]。我国自20世纪80年代以来，对北京[17-18]、上海[19]、成都[20]、重庆[1]、西安[21]、兰州[22]、乌鲁木齐[23]、呼和浩特[24]、京津冀[25]等地大气混合层厚度特征及对大气污染物影响进行了研究，研究表明我国大气边界层西高东低，夏季最高、冬季最低[26]，其中，兰州[22]和呼和浩特[24]城市下垫面的混合层厚度可达到2 000 m以上。

大气稳定度是衡量大气污染严重程度的重要指标之一[27]。20世纪80年代以来，我国学者陆续开展了大气稳定度方面的研究工作，验证了不同方法划分的大气稳定度的合理性，统计了不同城市、不同下垫面的大气稳定度特征[28]。乌鲁木齐作为污染严重的西部城市，郊区稳定类所占比例高于城区，城区中性类高于郊区，南郊和城区不稳定类高于北郊[29]。上述表明大气混合层厚度和稳定度与大气污染关系密切。

本文利用位于乌鲁木齐市南郊至北郊的4座100 m塔风速、气温和感热通量资料，乌鲁木齐市环境监测站*AQI*观测资料，计算乌鲁木齐市大气混合层厚度和稳定度，分析不同变化特征及其与污染的关系。

① **收稿日期：**2018-10-16； **修订日期：**2019-01-29
基金项目：中国沙漠气象科学研究基金（Sqj2016006）；国家自然科学基金（41575011）；中国沙漠气象科学研究基金（Sqj2015009）；中国博士后科学基金资助（2016M592915XB）
作者简介：李振杰（1982-），男，硕士，云南省临沧市气象局. E-mail:lizhenjie17@163.com
通讯作者：金莉莉（1984-），女，博士，中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所. E-mail:jinlili1984@126.com

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

乌鲁木齐市为开口朝北的喇叭口地形，北部为准噶尔盆地、南部为天山山脉。乌鲁木齐市南郊和城区全年主导风向为偏北风和偏南风，北郊主导风向为偏东风和偏西北风；冬季，城区和北郊多静风。乌鲁木齐市具有明显的山谷风，白天谷风风向为偏北风，夜间山风风向为偏南风；夏季山、谷风转换时间与春、秋季相差 1 ~ 2 h，从 8:00 ~ 10:00 开始，谷风很快形成、发展，并持续到 19:00 ~ 21:00，随后，山风开始形成和发展，直到次日 8:00 ~ 10:00 左右[30]。

为了研究乌鲁木齐市的污染，从乌鲁木齐南郊、市区到北郊建立了 5 座 100 m 气象塔，分别是南郊燕南立交(87°34′47″E,43°42′19″N，海拔高度1 009 m)、城区水塔山(87°38′50″E,43°49′06″N，海拔高度 890 m)和鲤鱼山(87°34′45″E,43°50′41″N，海拔高度 821 m)、近北郊红光山(87°38′05″E,43°54′14″N，海拔高度 717 m)、北郊米东(87°41′37″E,44°01′58″N，海拔高度 568 m)，具体的铁塔分布见图 1[31-32]。因水塔山数据缺失，本文只采用 4 个塔的数据。

1.2 混合层厚度和稳定度计算方法

本文采用国标法来判定乌鲁木齐市大气混合层厚度(表 1)。具体如下：

不稳定和中性层结，即大气稳定度为 A ~ D 时，

$$L = a u_{10} / f \tag{1}$$

稳定层结，即大气稳定度为 E 和 F 时，

$$L = b \cdot \sqrt{u_{10} / f} \tag{2}$$

式中：L 为混合层厚度；f 是地转参数，$f = 2\Omega \sin\varphi$，Ω 是地转角速度($7.29 \times 10^{-5}\ \cdot \mathrm{s}^{-1}$)，$\varphi$ 是观测点地理纬度；a、b 是混合层系数，a 的取值对应不同的稳定度：$A = 0.073$、$B = 0.048$、$C = 0.031$、$D = 0.022$，b 的取值也对应不同的稳定度：$E = 1.66$、$F = 0.70$(中华人民共和国国标，1992)；u_{10}为 10 m 平均风速，大于

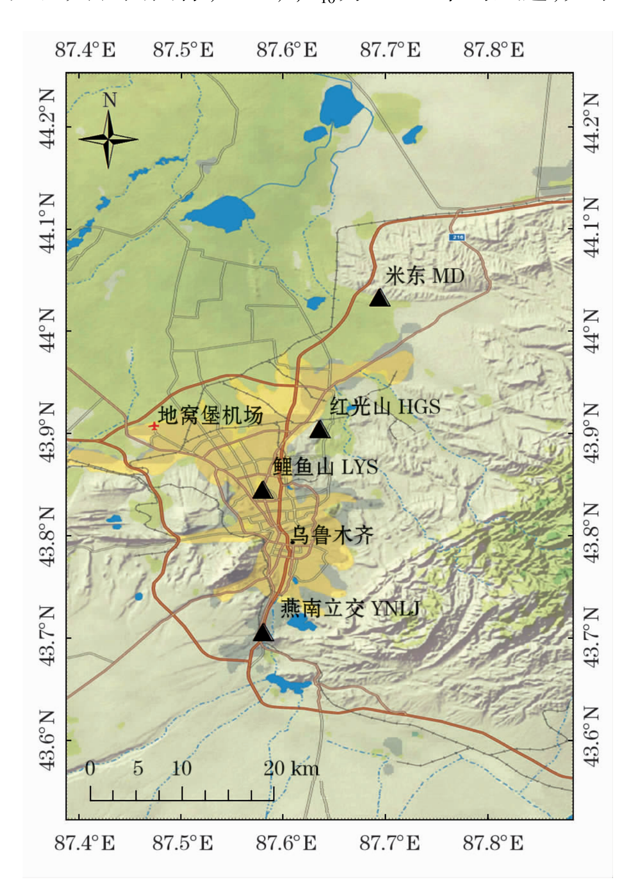


图 1 乌鲁木齐市 4 座 100 m 铁塔地理位置示意图

Fig. 1 Site map of four 100 m tower in Urumqi City

表 1 温差—风速法大气稳定度划分标准[33]

Tab. 1 Standard of atmospheric stability based on temperature difference-wind speed

地面风速 u / m·s^{-1}	$\frac{\Delta T}{\Delta z}$ / [℃·(100 m)$^{-1}$]						
	$\frac{\Delta T}{\Delta z} \leqslant -1.5$	$-1.4 \leqslant \frac{\Delta T}{\Delta z} \leqslant -1.2$	$-1.1 \leqslant \frac{\Delta T}{\Delta z} \leqslant -0.9$	$-0.8 \leqslant \frac{\Delta T}{\Delta z} \leqslant -0.7$	$-0.6 \leqslant \frac{\Delta T}{\Delta z} \leqslant 0.0$	$0.1 \leqslant \frac{\Delta T}{\Delta z} \leqslant 2.0$	$2.0 < \frac{\Delta T}{\Delta z}$
$u < 1$	A	A	B	C	D	F	F
$1 \leqslant u < 2$	A	B	B	C	D	F	F
$2 \leqslant u < 3$	A	B	C	D	D	E	F
$3 \leqslant u < 5$	B	B	C	D	D	D	E
$5 \leqslant u < 7$	C	C	D	D	D	D	E
$U \geqslant 7$	D	D	D	D	D	D	D

注：在此文献基础上改过，与文献[34]相同

6 m·s⁻¹时,u_{10}均取6 m·s⁻¹。

2 结果分析

2.1 混合层厚度空间变化特征

从图2看出,乌鲁木齐市混合层厚度随着海拔高度的降低而减小,夏季和冬季混合层厚度均表现出南郊>近北郊>北郊>城区的特征,即地势高的南郊混合层厚度最大。夏季混合层厚度在1 569~1 728 m之间,冬季混合层厚度在526~1 156 m之间,表明地形对乌鲁木齐市污染物在垂直方向被热力湍流、动力湍流、对流输送所能达到的高度以及大气污染物在水平方向扩散的空间范围具有重要的影响。

2.2 混合层厚度时间变化特征

2.2.1 年变化特征 从图3看出,乌鲁木齐混合层厚度夏季高、冬季低。燕南立交、鲤鱼山、红光山和米东月平均混合层厚度分别在514 m(2月)~946 m(4月)、295 m(1月)~882 m(6月)、245 m(1月)~969 m(6月)、184 m(1月)~773 m(6月)之间,这与杨静等[34]研究的结果相似。同时,可以看出,燕南立交、鲤鱼山、红光山和米东月平均最大混合层厚度约为月平均最小混合层厚度的1.8、3.0、4.0和4.2倍,也体现出地形对混合层厚度的影响,地势高的南郊燕南立交有利于大气污染物的扩散,从南郊往北郊,愈不利于大气污染物的扩散。

2.2.2 月变化特征 图4是乌鲁木齐市红光山、鲤鱼山、米东、燕南立交逐月混合层厚度出现频率的分布情况。从6月~次年4月,500~1 000 m范围内的混合层厚度出现频率最多,且每个月每座塔此范围内出现的频率各不相同。

红光山6~7月、3月500~1 000 m范围内的频率超过21%,8~11月、2月的频率超过18%,12~1月的频率超过14%,4月的频率为8%;鲤鱼山6~8月、2~3月500~1 000 m范围内的频率超过20%,9~12月的频率超过16%,1月的频率为13%,4月的频率为8%;米东6~7月、10月、2~3月500~1 000 m范围内的频率超过22%,8~9月、11~1月的频率超过13%,4月的频率为8%;燕南立交11~次年1月、3月500~1 000 m范围内的频率超过20%,7~10月、2月的频率超过16%,4月的频率为9%。

6~9月混合层厚度基本在500 m以上,其概率均超过10%;10月开始1 500 m高度以上的概率明显减小,11~次年2月1 500 m高度以上的概率不超过7%,其中红光山、鲤鱼山、米东小于2%。

2.2.3 日变化特征 从图5看出,受太阳辐射的影响,日出后混合层厚度迅速增加,中午及午后这段时间达到峰值,下午和傍晚迅速下降。夏季混合层厚度日变化明显、冬季不明显;燕南立交春季和夏季、红光山春季和秋季混合层厚度日变化相差较小。燕南立交、鲤鱼山、红光山和米东春季混合层厚度日平均最大值分别为1 639、1 395、1 417 m和1 290 m;夏季分别为1 628、1 569、1 772 m和1 596 m;秋季分别为1 497、1 236、1 375 m和1 216 m;冬季分别为1 156、693、689 m和526 m。燕南立交、鲤鱼山、红光山和米东夏季日平均最大值是冬季的1.4、2.3、1.7和3.0倍,表明冬季大气的垂直平均稀释能力最差,且北郊最差、南郊较好,这与乌鲁木齐南高北低的峡口地形有关。

2.3 混合层厚度与感热通量的关系

地表辐射收支是大气边界层产生气流运动的主要热动力条件,气流运动发展所需能量主要依赖近地层的感热通量输送维持。因此,大气边界层的形成与发展,与净辐射、地—气温差和感热通量有关[35]。

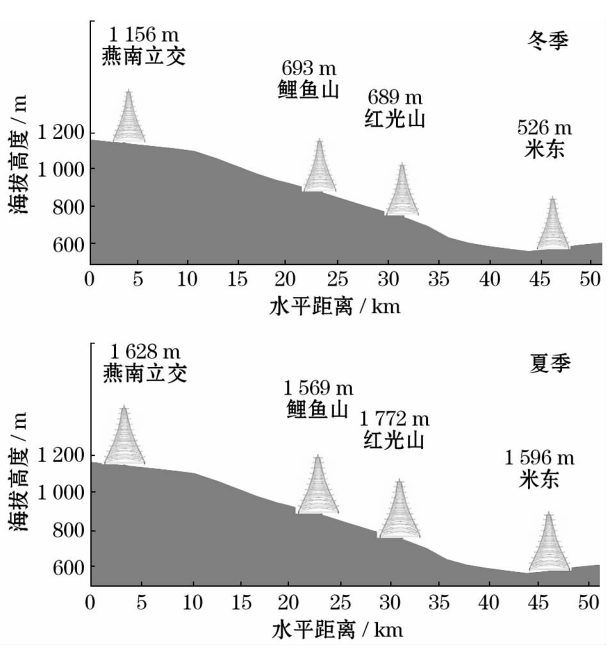


图2 燕南立交、鲤鱼山、红光山和米东夏季、冬季混合层厚度示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mixed layer thickness at YNLJ, LYS, HGS and MD in summer and winter season

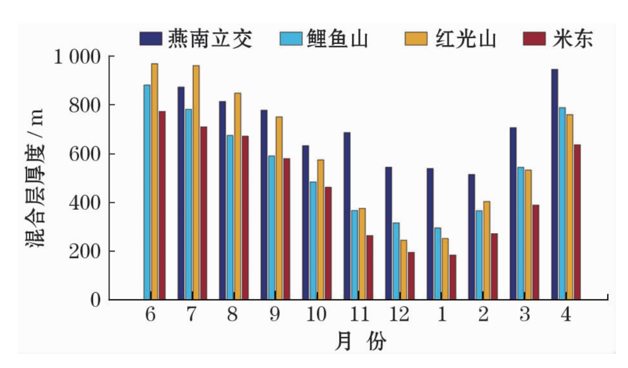


图3　2013 年 6 月 1 日 ~2014 年 5 月 16 日燕南立交、鲤鱼山、红光山和米东混合层厚度年变化特征

Fig. 3　Annual variation characteristics of mixing layer thickness from Jun 1th 2013 to May 16 2014 at YNLJ, LYS, HGS and MD

从图 6 看出,不同月份城区与郊区白天感热通量与混合层高度二者之间存在较好的正相关关系,即感热通量越大,混合层厚度越厚;相关性 7 月 > 10 月 > 1 月,7 月相关系数 R^2 在 0.72 ~ 0.79 之间,10 月 R^2 在 0.53 ~ 0.69 之间,1 月 R^2 在 0.39 ~ 0.42 之间。

7 月,混合层发展旺盛,厚度可达 1 500 m 高度左右,然后开始缓慢发展。乌鲁木齐市从南至北 4 个观测站点在 10 月和 1 月分别需 0 ~ 200 W · m^{-2} 左右和 0 ~ 40 W · m^{-2} 左右的感热通量以支撑混合层不断发展并达到峰值。1 月、7 月和 10 月混合层具有相似的发展规律,但 1 月混合层跃变现象不明显。

从图 7 可知,比较鲤鱼山和郊红光山 1 月和 10

图4　各月最大混合层高度出现的频率

Fig.4　Frequency of maximum mixing height each month

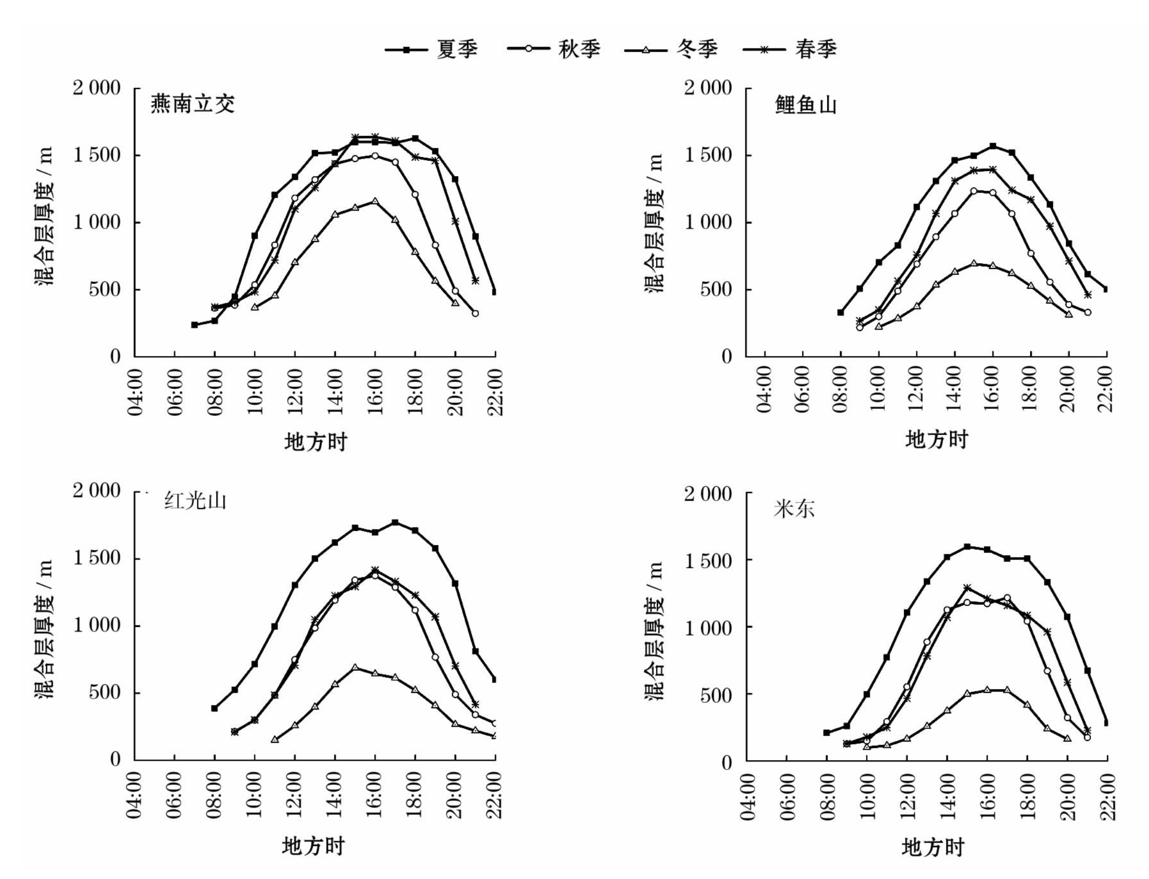


图5 2013年6月1日~2014年5月16日混合层厚度四季日平均变化特征

Fig. 5 Annual variation characteristics of mixing layer thickness from Jun 1th 2013 to May 16 2014 at YNLJ, LYS, HGS and MD

月晴天平均混合层厚度,1月明显偏小,而10月又明显比7月低;燕南立交和米东10月与7月晴天平均混合层厚度相差较小;而1月晴天平均混合层厚度,红光山和鲤鱼山比燕南立交约小400 m。7月和10月感热通量与混合层厚度的高度及分布范围上有很好的对应关系;但1月白天鲤鱼山虽然有较强的的感热输送,混合层厚度却没有得到很好发展,高度并不高。白天混合层厚度和感热通量峰值并不是同步出现,而是前者要约晚1~3 h,即白天地面感热通量经过一段时间内的能量累积才可促使混合层发展到一定高度。在城区鲤鱼山,白天混合层厚度峰值同样比感热通量峰值晚2~3 h,其他三座铁塔则晚1~2 h。由此可以判断,南郊1月混合层厚度与其风速、摩擦速度大有关,即对流和湍流作用较大,对混合层的发展起较大作用,而城区混合层厚度的发展主要与风速对流有关。

分析晴天平均感热通量最大值,具有1月<10月<7月,7月感热通量正值持续时间比1月长约2~6 h的特征。7月和1月感热通量,燕南立交分别为197.0 W·m^{-2}和61.7 W·m^{-2}、鲤鱼山分别为219.6 W·m^{-2}和64.9 W·m^{-2}、红光山分别为258.6 W·m^{-2}和27.5 W·m^{-2}、7月米东为263.6 W·m^{-2}。可见,7月城区和郊区都有充足的能量促进混合层发展,且混合层厚度高值区最长持续时间出现在燕南立交。

7月晴天夜间四座铁塔平均感热通量最小值分别为:燕南立交 −20.2 W·m^{-2}、鲤鱼山 −70.3 W·m^{-2}、红光山 −12.7 W·m^{-2}和米东 −18.1 W·m^{-2}。1月晴天夜间平均感热通量最小值,分别为:燕南立交 −105.5 W·m^{-2}、鲤鱼山 −49.2 W·m^{-2}和红光山 −4.5 W·m^{-2}。4座铁塔中,夜间辐射冷却能力较强的是7月晴天夜间的城区鲤鱼山和1月晴天的南郊燕南立交,强辐射冷却极易形成强辐射逆温,这可以促进边界层的形成,同时从图中可以看出,1月南郊燕南立交混合层厚度较大。

2.4 大气稳定度出现频率日变化

图8给出了温差—风速法确定的红光山、鲤鱼山、米东、燕南立交大气稳定度的日变化规律。从稳定度日变化来看,温差—风速法的结果比较合理。4座塔各个季节稳定度日变化明显,白天多以不稳定

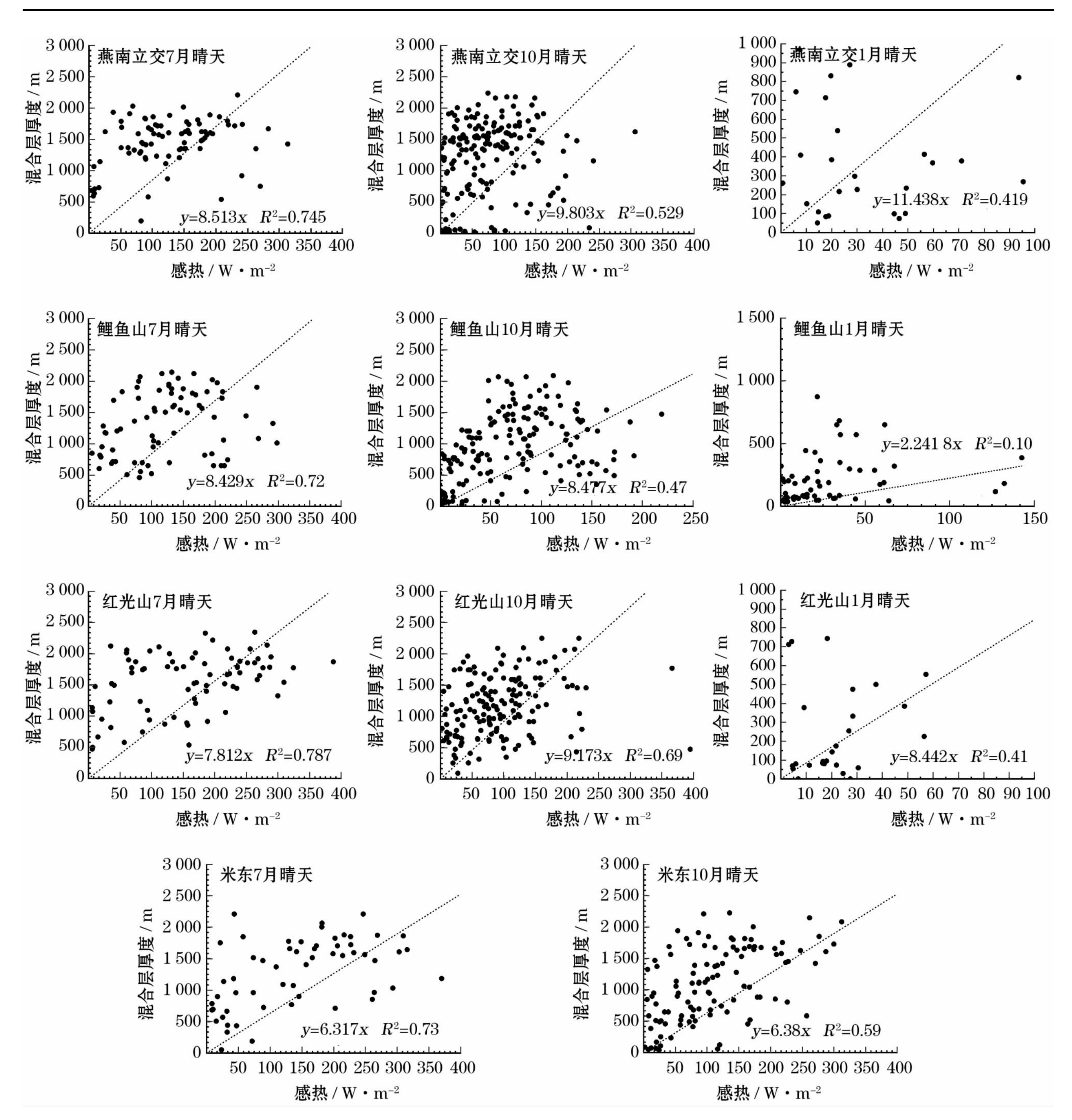


图6 红光山、鲤鱼山、燕南立交、米东7月、10月、1月晴天混合层厚度与感热通量的关系

Fig. 6 Relationship between mixing layer height and sensible heat flux in July, October and January at HGS, LYS, YNLJ and MD

为主,夜间多为稳定层结,这反映了热力和动力因素共同作用。白天热力对流旺盛,夜间由于辐射冷却使得对流受到抑制,因此白天多为不稳定,夜间多为稳定。

夏季白天(8:00 ~ 20:00)不稳定(A ~ C 类)所占比例最大。红光山、鲤鱼山、米东、燕南立交夏季不稳定度(A ~ C 类)比例分别达 43.6%、44.1%、41.9%、44.8%;其次是春季,分别达 39.1%、42.6%、33.3%、38.5%;然后为秋季,分别达 35.8%、35.4%、31.9%、34.6%;最后为冬季,分别达 27.1%、33.8%、18.7%、28.9%。不稳定中以 B 类所占比例最高,且仍为夏季最高,各座气象塔 B 类比例分别为 26.7%、21.0%、24.6%、26.8%;冬季最低,比例分别为 13.6%、17.1%、9.0%、15.4%。

秋季夜间(20:00 ~ 次日 8:00)稳定(E、F 类)所占比例最大。红光山、鲤鱼山、米东、燕南立交秋季稳定度(E、F类)比例分别达35.5%、30.0%、

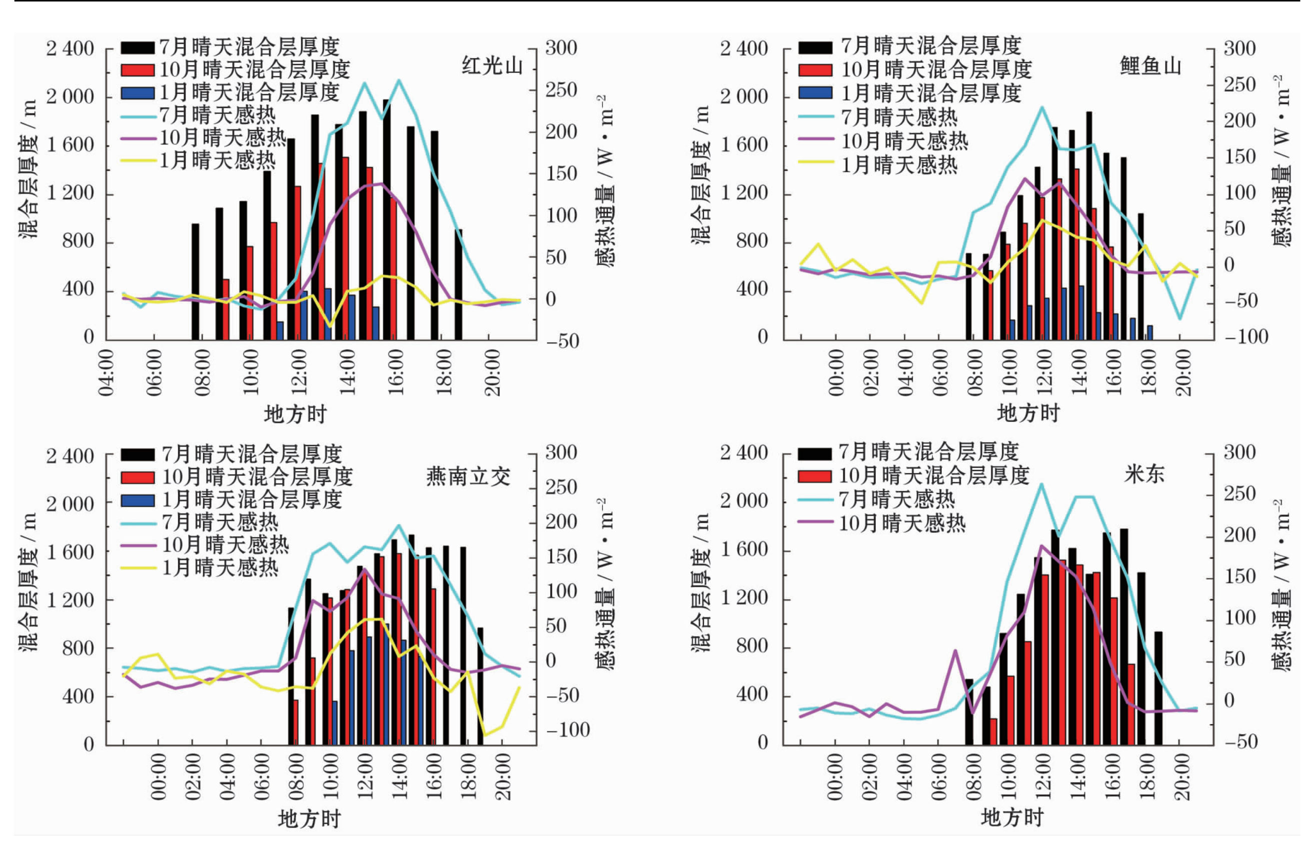
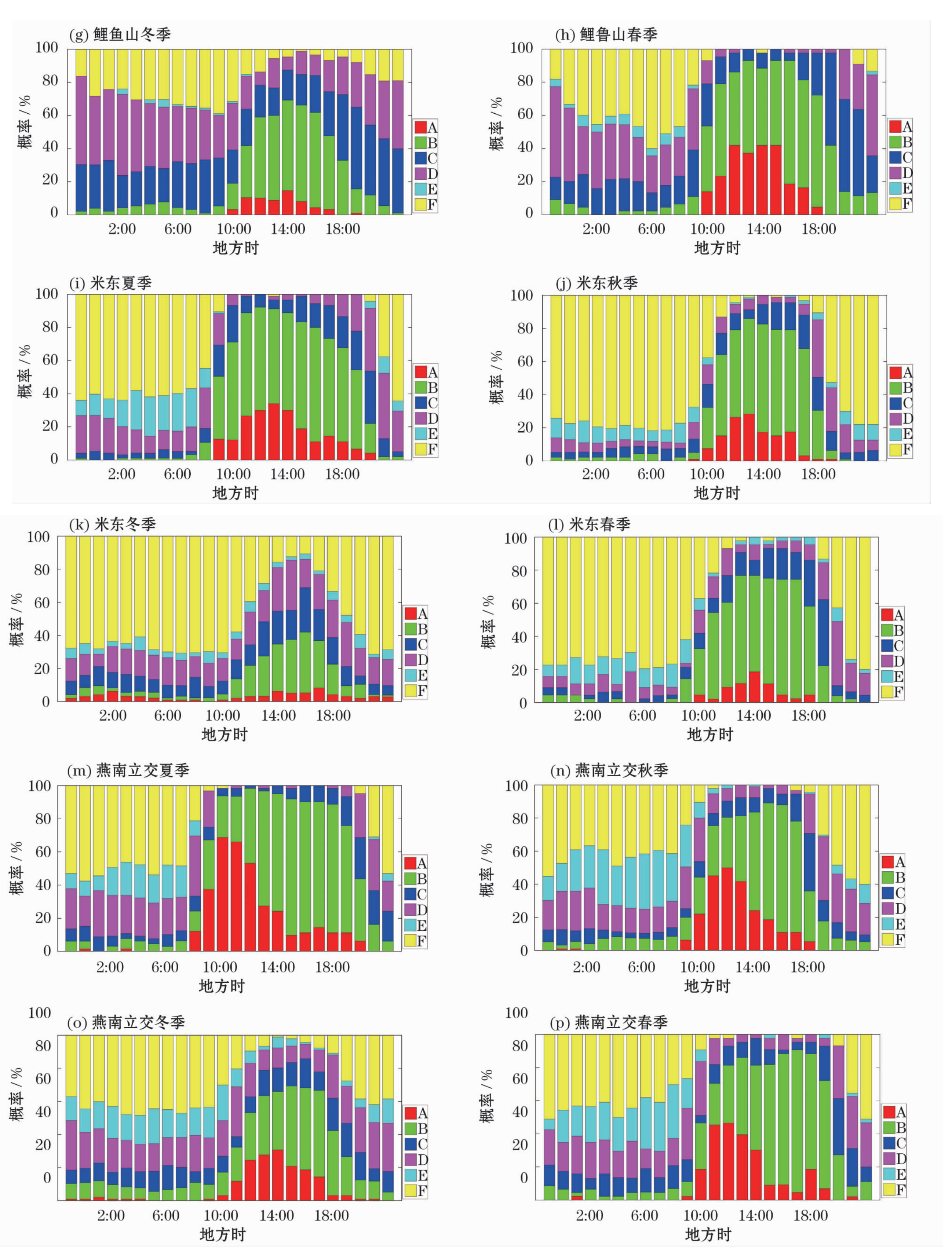


图 7　红光山、鲤鱼山、燕南立交、米东晴天混合层厚度与感热通量日变化

Fig. 7　Daily variation of mixing layer height and sensible heat flux in clear day at HGS, LYS, YNLJ and MD

(a) 红光山夏季
(b) 红光山秋季
(c) 红光山冬季
(d) 红光山春季
(e) 鲤鱼山夏季
(f) 鲤鱼山秋季
概率 / %
地方时
A
B
C
D
E
F



注:夏季(6~8月);秋季(9~11月);冬季(12~2月);春季(3~5月)

图8 温差—风速法确定的红光山、鲤鱼山、米东、燕南立交四季大气稳定度出现频率日变化特征

Fig. 8 Daily variation of atmospheric stability frequency based on temperature difference-wind speed in all seasons at HGS, LYJ, MD and YNLJ

46.0%、35.8%;夏季最小,分别达21.4%、17.4%、35.8%、29.6%。稳定中以F类所占比例最高,且仍为秋季最高,各个塔F类比例分别为19.4%、26.7%、41.3%、24.8%;夏季最低,比例分别为7.7%、13.3%、28%、23.4%。

4座塔大气稳定度以B类、D类、F类为主,春季和夏季以B类出现频率最高,秋季和冬季以F类最高(鲤鱼山冬季除外)。春季B类稳定度出现频率为21.5~23.6%,夏季为21~26.8%;秋季F类稳定度出现频率为19.4~41.3%,冬季为22.5~35.6%。D类稳定度集中出现在红光山、鲤鱼山夏季和冬季及鲤鱼山春季,在16.6%~22.6%之间。

米东E、F类稳定度所占频率在4座塔中最高,鲤鱼山最低,这与米东逆温强度最强、鲤鱼山最弱相吻合。

从冬季到春季,大气层结总体从稳定向不稳定过渡,这种变化主要体现在日出后和日落前的这段时间,A类和B类稳定度明显增多。

虽然个别情况夜间出现了A类稳定度,如米东冬季、燕南立交四季夜间有A类出现,其原因可能是夜间铁塔上下层不是处于同一气团[36]。

2.5 乌鲁木齐 *AQI* 分布特征

乌鲁木齐市*AQI*最低值和最高值分别在夏季和冬季(图9a和9b),*AQI*最低值在城北米东监测点为62.4,*AQI*最高值城北(米东监测点)为228、城区中部在180~200之间、城区南部为160,与乌鲁木齐混合层厚度的空间分布一致。

2.6 乌鲁木齐 Froude 数特征

本文用弗雷德数(Froude数)分析地形对气流影响,其定义为[37]:

$$Fr = U / (N \times h) \tag{3}$$

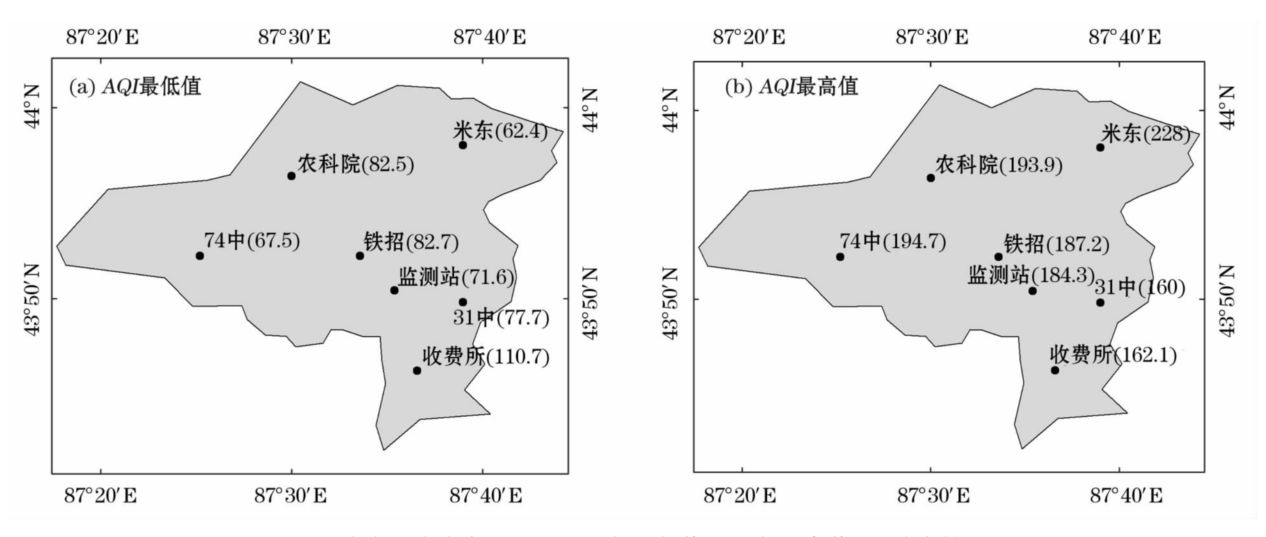


图9 乌鲁木齐市各监测站 *AQI* 年最低值(a)、年最高值(b)分布情况

Fig.9 Distribution of annual minimum (a) and annual maximum (b) *AQI* values at monitoring stations in Urumqi

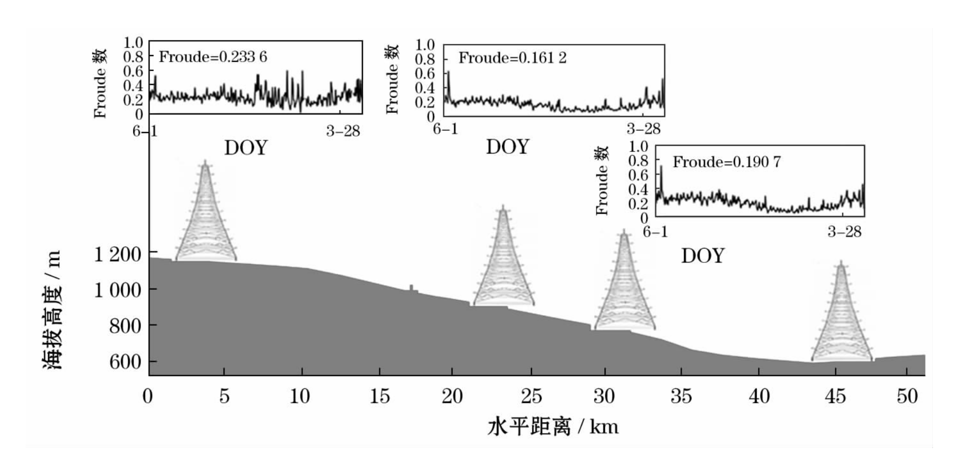


图10 燕南立交、鲤鱼山和红光山 Froude 数日序列特征

Fig.10 Daily sequence characteristics of Froude values at YNLJ, LYS and HGS

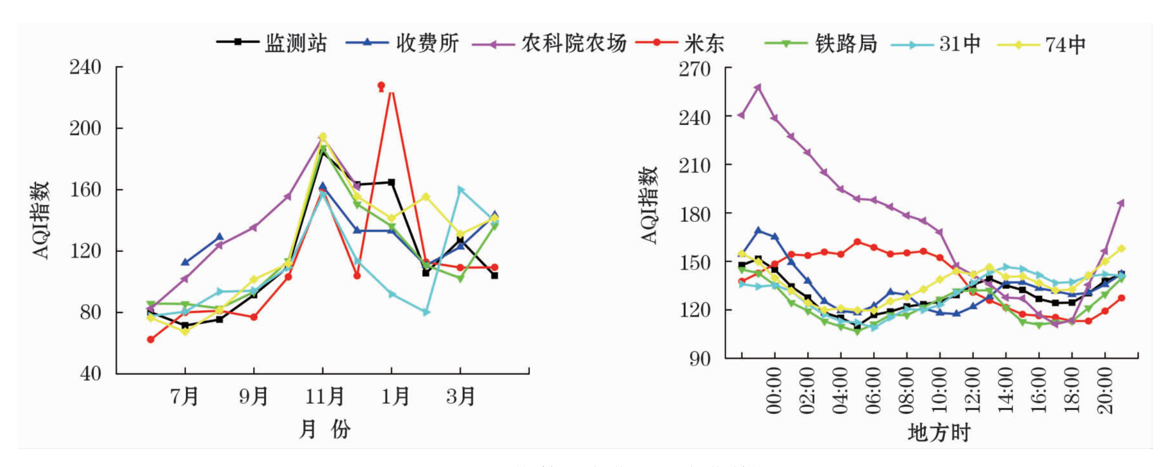


图 11　*AIQ* 指数月变化和日变化特征

Fig. 11　Monthly and daily variations of *AIQ*

图12 逐月空气质量等级频率分布

Fig.12 Frequency distribution of monthly air quality grade

式中:U 为 10~100 m 之间的水平风速;h 为山体的高度(近北郊红光山为 40 m;城区鲤鱼山为 43 m;南郊燕南立交为 180 m);N 为逆温期间的 Brunt-vaisala 或浮力频率。

$$N=[(g/T)(\partial\theta/\partial z)]^{1/2} \quad (4)$$

式中:T 为平均绝对温度,设定为 300 K;g 是重力加速度;$\partial\theta/\partial z$ 是位温梯度;N 反映了逆温强度作用。

从图 10 看出,燕南立交、红光山和鲤鱼山日平均 Froude 数全部在临界值 1 以下(而夏季 Froude 数有超过 1 的情况)[38-41],表明乌鲁木齐市的污染物很难通过气流越过周围山峰输送。Froude 数也有随地势降低而增大的特点,且燕南立交冬季较大,鲤鱼山和米东季小、夏和秋季大。可见燕南立交对大气污染物的扩散输送能力最强。

2.7 乌鲁木齐市大气稳定度、混合层厚度与大气污染的关系

从图 11 看出,乌鲁木齐市月平均 *AQI* 冬季最高、夏季最低,与 F 类稳定度所占比例冬季最高、夏季最低相一致(图 8),与混合层厚度冬季低、夏季高相反(图 5)。可见大气稳定度与混合层厚度与 *AIQ* 指数存在明显的相关性。

AIQ 指数有明显的季节变化特征。采暖季(10~次年 4 月)各监测站平均 *AIQ* 指数基本上在 100 以上,即均为Ⅲ级以上污染。位于乌鲁木齐市北部的农科院农场和米东污染最严重,米东 1 月 *AIQ* 指数 >200,为Ⅳ级污染,这与市区北部地势平坦、地形开阔有关。非采暖季 *AIQ* 指数基本上 <100。

AIQ 指数有明显的日变化特征。农科院农场的 *AIQ* 日平均值最大,为 173,其次是米东为 138。这两个站点 *AIQ* 值正午至傍晚较低,夜间较高;农科院农场夜间最大值可达到 260,比其他监测点约高出 100,这与该站点位于国道附近有关。其余四个监测站 *AIQ* 指数也是夜间相对较高,白天较低;日出前后最低,最大值在深夜或下午。可见,*AIQ* 指数与混合层厚度日变化呈反相位关系。

图 12 是相对应的空气质量等级的频率分布,可以看出,与混合层厚度频率分布相反。夏季(6~8 月)空气质量等级为 2 级的频率较高,约 70% 以上,基本上没有 4~6 级的频率分布。秋季(9~11 月)空气质量等为 2 级的频率减少,只占 30% 以上,3~6 级所占的频率增多,到了冬季(12~2 月),4~5 级的频率比秋季有所增加,而春季(3~5 月)略有减少。

3 结 论

(1)乌鲁木齐混合层厚度,夏季白天最厚达 1 569~1 772 m、冬季白天最厚达 526~1 156 m。冬季混合层厚度随着乌鲁木齐市海拔高度的降低而减小,南郊冬季混合层厚度比其他观测点大,与南郊冬季风速大、摩擦速度大有关,而城区冬季白天混合层厚度的发展主要是风速对流起更大的作用;冬季大气的垂直平均稀释能力是最差的,尤其在夜间至清晨最差。500~1 000 m 范围内的混合层厚度出现频率最多,10 月起混合层厚度在 1 500 m 及其以上的概率明显减小。

(2)乌鲁木齐市城区和郊区各季节 B、D、F 类稳定度出现最多,A 类和 E 类出现较少。白天不稳定所占比例,夏季最大、冬季最小;夜间稳定所占比例,秋季最大、夏季最小。中性类所占比例,各个季节差不多。春季、夏季和冬季中性层结日变化与稳定日变化位相相同,但秋季中性层结白天高、夜间低。北郊稳定状态频率最多,而城区最少。

(3)乌鲁木齐市 *AQI* 指数与混合层厚度日变化呈反相位关系。市区北部污染最严重,北郊 1 月 *AQI* 指数 >200,为 4 级污染,这与市区北部地势平坦、地形开阔,冬季混合层厚度低、动力参数较小、垂直扩散能力差有关。乌鲁木齐市 Froude 数全部在临界值 1 以下,表明污染物很难通过气流越过周围山峰输送;地势高的南郊对污染物的输送能力最强,且冬季输送比地势低的城区和北郊强,使得城区北部和北郊污染最严重。

参考文献(References)

[1] 孟庆珍,朱炳胜. 重庆市大气混合层厚度的计算和分析[J]. 成都气象学院学报,1999,14(2):163-171. [MENG Qingzhen, ZHU Bingsheng. Calculation and analysis of the thickness of atmospheric mixed layer above Chongqing[J]. Journal of Chengdu Institute of Meteorology,1999,14(2):163-171.]

[2] NOZAKI K Y. Mixing depth model using hourly surface observations[R]. USAF Envirinmental Technical Applications Center, Report,1973:7053.

[3] HOLZWORTH G C. Mixing depths, wind speeds and air pollution potential for selected locations in the United States[J]. Journal of applied Meteorology,1967,6(6):1039-1044.

[4] GARCIA M A,SANCHEZ M L,DE TORRE B,et al. Characterisation of the mixing height temporal evolution by means of a laser dial system in an urban area:Intercomparison results with a model application[J]. AnnalesGeophysicae,2007,25(10):2119 – 2124.

[5] 黄柏良. 城市通风及其影响城市热岛效应与空气质量研究[D]. 长沙:中南大学,2011:70 – 74. [HUANG Boliang. Urban ventilation and its impact on urban heat island and air quality[D]. Changsha:Central South University,2011:70 – 74.]

[6] 苑克娥,张世国,胡顺星,等. 对流层低层臭氧的差分吸收激光雷达测量[J]. 强激光与粒子束,2013,25(3):553 – 556. [YUAN Ke'e,ZHANG Shiguo,HU Shunxing,et al. Measurements of ozone using ultraviolet differential absorption lidar in low troposphere[J]. High Power Laser and Particle Beams,2013,25(3):553 – 556.]

[7] 于海利,胡顺星,苑克娥,等. 合肥上空大气二氧化碳 Raman 激光雷达探测研究[J]. 光子学报,2012,41(7):812 – 817. [YU Haili,HU Shunxing,YUAN Ke'e,et al. Observations of atmospheric CO_2 concentration profiles over Hefei area with Raman lidar[J]. Acta Photonica Sinica,2012,41(7):812 – 817.]

[8] 范广强,胡顺星,谢军,等. 合肥地区夏季臭氧,温度,水汽,气溶胶,二氧化碳测量与对比分析[J]. 大气与环境光学学报,2009,(1):22 – 29. [FAN Guangqiang,HU Shunxing,XIE Jun,et al. Measurement and comparison of ozone,temperature,water vapor,aerosol and CO_2 at summer over Hefei[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics,2009,(1):22 – 29.]

[9] BOSSIOLI E,TOMBROU M,DANDOU A,et al. The role of planetary boundary-layer parameterizations in the air quality of an urban area with complex topography[J]. Boundary-layer meteorology,2009,131(1):53 – 72.

[10] EMEIS S,JAHN C,MUNKEL C,et al. Multiple atmospheric layering and mixing-layer height in the Inn valley observed by remote sensing[J]. Meteorologische Zeitschrift,2007,16(4):415 – 424.

[11] MOK T M,RUDOWICZ C Z. A lidar study of the atmospheric entrainment zone and mixed layer over Hong Kong[J]. Atmospheric Research,2004,69(3):147 – 163.

[12] SOHI S, LOPEZ-CAPEL E, KRULL E, et al. Biochar, climate change and soil: A review to guide future research[J]. CSIRO Land and Water Science Report,2009,5(9): 17 – 31.

[13] SICARD M, PEREZ C, ROCADENBOSCH F, et al. Mixed-layer depth determination in the Barcelona coastal area from regular lidar measurements:Methods,results and limitations[J]. Boundary-Layer Meteorology,2006,119(1):135 – 157.

[14] EMEIS S,SCHAFER K,MUNKEL C,et al. Evaluation of the interpretation of ceilometer data with RASS and radiosonde data[J]. Boundary-layer meteorology,2012,143(1):25 – 35.

[15] HOLZWORTH G C. Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States[J]. Monthly Weather Review,1964,92(5):235 – 242.

[16] HOLZWORTH G C. Mixing depths,wind speeds and air pollution potential for selected locations in the United States[J]. Journal of applied Meteorology,1967,6(6):1039 – 1044.

[17] 程水源,张宝宁,白天雄,等. 北京地区大气混合层高度的研究及气象特征[J]. 环境科学丛刊,1992,13(4):46 – 52. [CHENG Shuiyuan, ZHANG Baoning, BAI Tianxiong, et al. A study on the thickness of atmospheric mixed layer and the characteristics of meteorological above Urumqi[J]. Environmental Science Series,1992,13(4):46 – 52.]

[18] 尤焕苓,刘伟东,谭江瑞. 北京地区平均最大混合层厚度的时间变化特征[J]. 气象,2010,36(5):51 – 55. [YOU Huanling, LIU Weidong, TAN Jiangrui. Temporal characteristics of atmospheric maximum mixing depth of Beijing[J]. Meteorological Monthly,2010,36(5):51 – 55.]

[19] 杨勇杰,谈建国,郑有飞,等. 上海市近 15 a 大气稳定度和混合层厚度的研究[J]. 气象科学,2006,26(5):536 – 541. [YANG Yongjie,TAN Jianguo,ZHENG Youfei,et al. Study on the atmospheric stabilities and the thickness of atmospheric mixed layer during recent 15 years in Shanghai[J]. Scientia Meteorologica Sinica,2006,26(5):536 – 541.]

[20] 孟庆珍,冯艺. 成都大气边界层厚度的计算和分析[J]. 成都气象学院学报,1996,11:73 – 81. [MENG Qingzhen, FENG Yi. Calculation and analysis of the thickness of atmospheric mixed layer above Chendu[J]. Journal of Chengdu Institute of Meteorology,1996,11:73 – 81.]

[21] 蔡新玲,吴素良,王繁强,等. 西安市近 10 年大气稳定度和边界层厚度特征[J]. 气象科技,2007,35(6):814 – 817. [CAI Xinling,WU Suliang,WANG Fanqiang,et al. Characteristics of atmospheric stabilities and ABL thickness in recent 10 years in Xi'an[J]. Meteorological Science and Technology,2007,35(6):814 – 817.]

[22] 王式功,姜大膀,杨德保,等. 兰州市区最大混合层厚度变化特征分析[J]. 高原气象,2000,19(3):363 – 370. [WANG Shigong, JIANG Dabang,YANG Debao,et al. A study on characteristics of change of maximum mixing depths in Lanzhou[J]. Plateau Meteorology,2000,19(3):363 – 370.]

[23] 赵克明,李霞,杨静. 乌鲁木齐大气最大混合层厚度变化的环境响应[J]. 干旱区研究,2011,28(3):509 – 513. [ZHAO Keming,LI Xia,YANG Jing. Envirenmental response to variation of the atmospheric maximum mixing depth in Urumqi[J]. Arid Zone Research,2011,28(3):509 – 513.]

[24] 卢士庆,闫宾,谷雨,等. 呼和浩特城区最大混合层厚度变化特征分析[J]. 四川环境,2011,30(4):67 – 71. [LU Shiqing,YAN Bin,GU Yu,et al. Changes of the maximum mixing depths in Hohhot city[J]. Sichuan Environment,2011,30(4):67 – 71.]

[25] 李梦,唐贵谦,黄俊,等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. 环境科学,2015,36(6):1935 – 1943. [LI Meng, TANG Guiqian,HUANG Jun,et al. Characteristics of winter atmospheric mixing layer height in Beijing-Tianjin-Hebei region and their relationship with the atmospheric pollution[J]. Environmental Science,2015,36(6):1935 – 1943.]

[26] 吴祖常,董保群. 我国陆域大气最大混合层厚度的地理分布与

季节变化[J]. 科技通报, 1998, 14(3): 158 – 163. [WU Zuchang, DONG Baoqun. Geographical distribution and seasonal variation of atmospheric maximum mixing depth over China[J]. Bulletin of Science and Technology, 1998, 14(3): 158 – 163.]

[27] 李宗恺, 潘云仙, 孙润桥. 空气污染气象学原理及应用[M]. 北京: 气象出版社, 1985: 19 – 23. [LI Zongkai, PAN Yunxian, SUN Runqiao. Theory on air pollution meteorology and application[M]. Beijing: Meteorology Press, 1985.]

[28] 康凌, 张宏升, 王志远, 等. 不同下垫面大气稳定度分类方法的对比研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(1): 66 – 70. [KANG Ling, ZHANG Hongsheng, WANG Zhiyuan, et al. Study on the atmospheric stability class over different surface conditions[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(1): 66 – 70.]

[29] 金莉莉, 何清, 李振杰, 等. 乌鲁木齐市低层大气稳定度分布特征的统计分析[J]. 气象, 2016, 42(8): 996 – 1006. [JIN Lili, LI Zhenjie, HE Qing, et al. Statistical analysis of low layer atmospheric stability distribution characteristics in Urumqi[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(8): 996 – 1006.]

[30] JIN L L, LI Z J, HE Q, et al. Observations and simulation of near-surface wind and its variations with topography in Urumqi, west China[J]. Journal of Meteorological Research, 2016, 30(6): 961 – 982. doi: 10.1007/s13351 – 016 – 6012 – 3.

[31] 金莉莉, 李振杰, 缪启龙, 等. 乌鲁木齐市近地层风切变指数特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(4): 81 – 86. [JIN Lili, LI Zhenjie, MIAO Qilong, et al. Characteristics of the wind shear exponent of the near-surface layer in Urumqi City[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(4): 81 – 86.]

[32] 廖国莲. 大气混合层厚度的计算方法及影响因子[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版), 2005, 26(4): 66 – 73. [LIAO Guolian. Calculation methods and influence factors of the thickness of atmospheric mixed layer[J]. Journal of the Graduates Sun Yat-Sen University (Natural Sciences, Medicine), 2005, 26(4): 66 – 73.]

[33] 蒋维楣, 孙鉴泞, 曹文俊, 等. 空气污染气象学教程[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 1 – 16. [JIANG Weimei, SUN Jianning, CAO Wenjun, et al. Air pollution meteorology course[M]. Beijing: Meteorology Press, 1985.]

[34] 李祥余. 塔克拉玛干沙漠腹地近地层微气象学特征研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2007. [LI Xiangyu. Research on micrometeorology characteristics in the surface layer in Taklimakan Desert hinterland[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2007.]

[35] 杨静, 李霞, 李秦, 等. 乌鲁木齐近 30 a 大气稳定度和混合层高度变化特征及与空气污染的关系[J]. 干旱区地理, 2011, 34(5): 747 – 752. [YANG Jing, LI Xia, LI Qin, et al. Variation characteristics of atmospheric stability and mixed layer thickness and their relation to air pollution in recent 30 years in Urumqi[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(5): 747 – 752.]

[36] 张强, 张杰, 乔娟, 等. 我国干旱区深厚大气边界层与陆面热力过程的关系研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(9): 1365 – 1374. [ZHANG Qiang, ZHANG Jie, QIAO Juan, et al. Relationship of atmospheric boundary layer depth with thermodynamic processes at the land surface in arid regions of China[J]. Science China Earth Science: 2011, 41(9): 1365 – 1374.]

[37] 乔娟. 西北干旱区大气边界层时空变化特征及形成机理研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2009. [QIAO Juan. The temporal and spatial characteristics of atmospheric boundary layer and its formation mechanism over arid region of northwest China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2009.]

[38] 张强, 赵映东, 王胜, 等. 极端干旱荒漠区典型晴天大气热力边界层结构分析[J]. 地球科学进展, 2007, 22(11): 1150 – 1159. [ZHANG Qaing, ZHAO Yingdong, WANG Sheng, et al. A study on atmospheric thermal boundary layer structure in extremely arid desert and gobi region on the clear day in summer[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(11): 1150 – 1159.]

[39] 王蓉, 范绍佳, 鲍若峪. 广东沿海地区大气稳定度的分类方法探讨[J]. 热带气象学报, 2011, 27(2): 251 – 256. [WANG Rong, FAN Shaojia, BAO Ruoyu. The analysis of atmospheric stability in Guandong coastal area[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(2): 251 – 256.]

[40] 张强. 大气边界层气象学研究综述[J]. 干旱气象, 2003, 21(3): 74 – 78. [ZHANG Qiang. Review of Atmospheric Boundary Layer Meterology[J]. Arid Meteorology, 2003, 21(3): 74 – 78.]

[41] 张强. 地形和逆温层对兰州市污染物输送的影响[J]. 中国环境科学, 2001, 21(3): 230 – 235. [ZHANG Qiang. The influence of terrain and inversion layer on pollutant transfer over Lanzhou City[J]. China Environmental Science, 2001, 21(3): 230 – 235.]

Characteristics of atmospheric mixing layer height and atmospheric stability in Urumqi region and their relationship with the atmospheric pollution

LI Zhen-jie[1], JIN Li-li[2,3], HE Qing[2,3], MIAO Qi-long[3], ALI Mamtimin[2]

(1 *Lincang Meteorological Bureau*, *Lincang* 677099, *Yunnan*, *China*; 2 *Taklimakan Desert Meteorology Field Experiment Station of CMA*, *Institute of Desert Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Urumqi* 830002, *Xinjiang*, *China*; 3 *College of Applied Meteorology*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: The meteorological observation data from four meteorological towers each of which is 100 meters high with ten layers, and *AQI* observation data from seven environmental monitoring stations in Urumqi City, Xinjiang, China during the period from June 2013 to April 2014 were collected and used to analyze the characteristics of the thickness and stability of the atmospheric mixed layer in this region, and their relationship with the atmospheric pollution was also analyzed. The results indicated that the thickness of the mixed layer was higher in suburbs and lower in urban areas in summer, and it was decreased along with the decrease of the terrain from the southern suburbs to the urban areas, and then to the place of the northern suburbs in winter. The thickness of the mixed layer was between 1 559 and 1 772 meters in the summer, and it was between 526 and 1 156 meters in the winter. When the thickness of the mixed layer was measured at the interval of 500 meters from the ground up to 2 km, it had the highest frequency of emergence with the height between 500 and 1 000 meters. In terms of the monthly change it was basically above 500 meters from June to September with the probability at each height interval being more than 10%. The probability at the interval above 1 500 meters was significantly reduced from October to next February. In terms of the daily variation, it was the highest from 13:00 PM to 16:00 PM and dropped rapidly after 16:00 PM. A large sensible heat transfer provided sufficient thermal conditions during the day, which was also reflected by the fact that the unstable stratification was mainly in the daytime but the stable stratification at night. When the atmospheric stability was classified, it showed that the percentage of the unstable (A-C) was almost the same between the suburban and urban areas in the summer, but in the winter the percentage of the stable (E, F) was the biggest in the northern suburbs while it was the weakest in urban areas. The *AQI* index was the largest in the winter, and it was increased along with the decrease of the terrain from the southern suburb to the urban area, and then to the northern suburb, which was related to the fact that there were more pollutants during the heating period, and the higher terrain in the southern suburbs is in favor of diffusing pollutants. In general, the spatial distribution of the thickness of atmospheric mixed layer was related to the meteorological elements, atmospheric stability and the terrain and it had the great influence on the distribution of *AQI* index. This study provided important information to the prediction of air pollution condition.

Key words: Urumqi; pollution; thickness of atmospheric mixed layer; atmospheric stability